

8. Ziegler J.G. and Nichols N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
9. Ala Eldin Abdallah Awouda and Rosbi bin Mamat. New PID Tuning Rule Using ITAE Criteria. International Journal of Engineering (IJE). Vol. 3. Issue 6. January 2010. P. 597–608.
10. Ротач В.Я. Расчет настройки реальных ПИД-регуляторов // Теплоэнергетика. 1993. №10. С. 31–35.

ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКИ НА ТЕПЛООБМЕН

Гусаков А.А., Митяков В.Ю., Можайский С.А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Одним из способов интенсификации теплообмена в металлургии является нанесение на теплообменные поверхности сферических лунок. Несмотря на интерес к интенсификации теплообмена с помощью лунок, оптимальная форма и взаимное расположение лунок до сих пор не установлены. Эта задача имеет столько взаимовлияющих факторов, что изначально представляет интерес разобраться с влиянием на теплообмен одиночной лунки на поверхности. В работе исследуется влияние относительной глубины лунки на интенсификацию теплообмена.

Для экспериментов изготовили модели в виде коробчатой конструкции одиночных лунок с относительной глубиной 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5. Стенки модели выполнены из листовой меди толщиной 0,6 мм. Таким образом, поверхность модели имеет постоянную температуру, близкую к 100 °С (рис. 1).

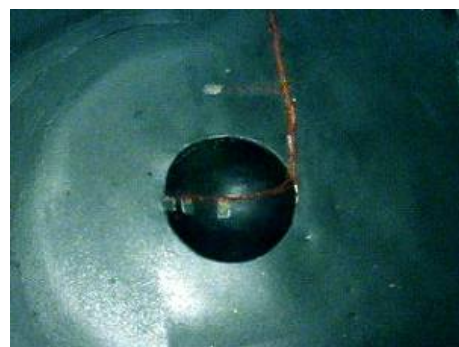
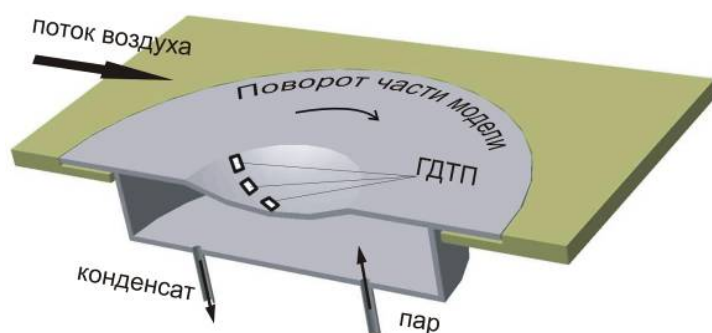


Рис. 1. Схема и внешний вид поворотной модели

Модели с лункой обдували воздухом в рабочей части аэродинамической трубы кафедры «Теоретические основы теплотехники» СПбГПУ. Труба позволяет вести опыты при скоростях потока 0,3 ... 50 м/с, причем степень турбулентности потока $Tu \leq 0,3$ %.

В наших экспериментах было предложено устанавливать градиентные датчики теплового потока (ГДТП) [1] по одной образующей лунки, а также на пластине. Для получения данных по всей поверхности лунки модель поворачивалась вокруг оси лунки. Для обеспечения условий обтекания, не зависящих от угла поворота пластины, была сделана модель с центральной подвижной частью, и внешней неподвижной. Подвижная часть соединялась со специальным поворотным столом, позволяющим поворачивать ее вокруг оси с точностью 1°. Неподвижная часть крепилась в рабочей части аэродинамической трубы. При переходе

от лунки одной относительной глубины к другой заменялась лишь внутренняя подвижная часть, а наружная, неподвижная, оставалась на месте. Конструкция модели с подвижной частью позволила получить данные при одинаковых условиях обтекания на всем наборе моделей.

Инструментальная база аэродинамической трубы, включающая систему PIV-диагностики, позволяет проконтролировать нулевой угол атаки при набегании потока на модель.

При обработке данных считалось, что течение в лунках симметрично относительно продольной оси. Такое допущение было сделано на основе опытов по визуализации течения, а также ряда работ посвященных физическому и компьютерному моделированию [2; 3; 4], в которых показано, что при ламинарном режиме картина течения симметрична. В случае, если режим течения в лунке турбулентный, то мгновенная картина течения не симметрична, но в среднем по времени течение симметрично [4]. Расчеты показали, что картина обтекания несимметрична только при наличии в потоке сильных возмущений.

Сигнал ГДТП оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя и регистрировался с помощью программы для записи и обработки информации ZetLab. Обработывались средние значения сигнала по промежутку времени, равному 20 с.

Данные опытов обрабатывались с помощью программы Golden Software Surfer 8.0, которая позволяет строить трехмерные графики распределения величин. Для каждой лунки построены графики распределения локального коэффициента теплоотдачи, отнесенного к среднему значению коэффициента теплоотдачи на пластине (рис. 2). На них хорошо видны участки, где происходит интенсификация теплообмена.

Как видно из построенных графиков, распределение коэффициентов теплоотдачи по лунке не равномерное и интенсификация происходит не над всей поверхностью. Оценить вклад лунки в интенсификацию теплообмена можно лишь посчитав средний коэффициент теплоотдачи по всей площади лунки. На рис. 2 показано относительное увеличение теплоотдачи с учетом увеличения площади теплообмена за счет облунения.

Зависимость распределения относительных коэффициентов теплоотдачи по поверхности лунок с относительной глубиной 0,4 и 0,5 практически идентичны. Только в одном из четырех исследуемых режимов на глубоких лунках и в следе за ними, есть небольшие области с интенсификацией теплообмена. Для остальных трех режимов по всей поверхности лунки коэффициент теплоотдачи уменьшается. За верхним по потоку уступом, образованным кромкой лунки, есть область, где коэффициент теплоотдачи падает более, чем в два раза. Увеличение коэффициента теплоотдачи не наблюдается и в следе за лункой.

Уменьшение коэффициента теплоотдачи в глубоких лунках, возможно, связано с тем, что массообмен между средой внутри луки и основным потоком незначителен.

Можно выделить значение числа Рейнольдса $Re=2,3 \times 10^4$, при котором, независимо от относительной глубины лунки, есть зоны, где коэффициент теплоотдачи больше значения коэффициента теплоотдачи на пластине. Для лунки с относительной глубиной 0,2 область с относительным коэффициентом теплоотдачи, меньшим единицы, наименьшая для всех исследованных режимов обтекания.

Интересно проследить увеличение коэффициента теплоотдачи не только в самой лунке, но и за ней. Отчетливо видно, что эффект интенсификации в следе за лункой полностью исчезает на расстоянии, равном диаметру лунки.

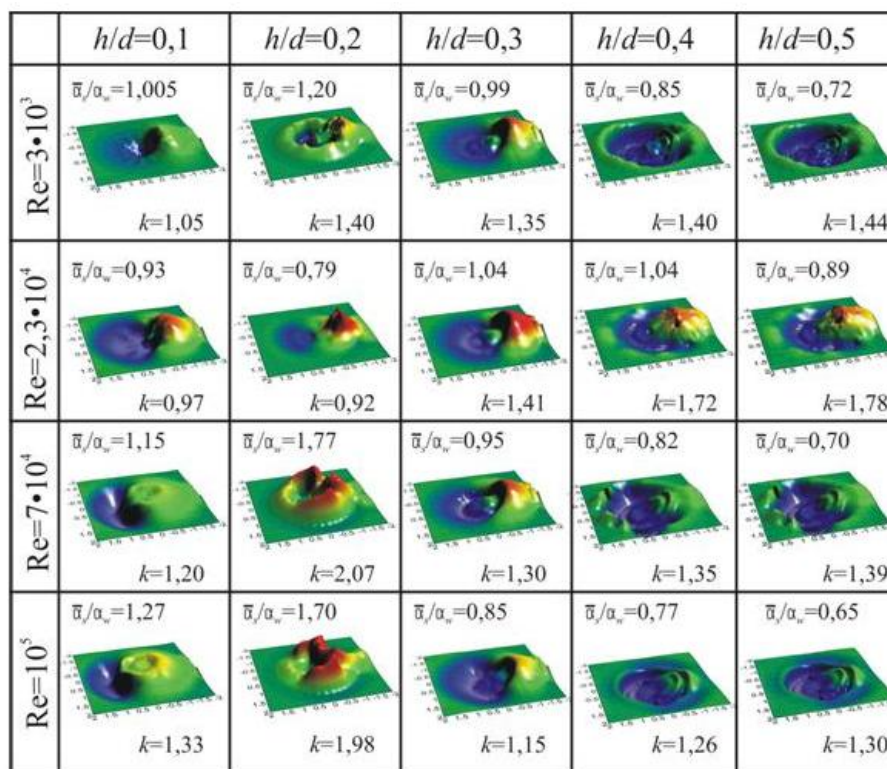


Рис. 2. Местные значения коэффициента теплоотдачи в лунке (отнесенные к значениям для пластины)

По результатам теплотометрии (рис. 2) видно, что интенсификация теплового потока максимальна в лунке с относительной глубиной 0,2. Коэффициент теплоотдачи на передней кромке выше, чем на пластине и сначала монотонно убывает, а затем возрастает по мере продвижения к центру лунки. На задней кромке лунки существенно возрастает теплоотдача. Несмотря на более низкие, в сравнении с пластиной, локальные коэффициенты теплоотдачи внутри лунки, значительная интенсификация по периметру и задней части приводит к тому, что средние коэффициенты теплоотдачи по всей лунке на 20–40 % выше, чем на плоской пластине без лунок.

Эксперименты показали, что в качестве интенсификаторов теплообмена возможно использовать лунки малой относительной глубины. Развитие поверхности за счет облунения само по себе не вносит однозначного вклада в суммарный тепловой поток.

Список использованных источников

1. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока: СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 168 с.
2. Терехов В.И., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сибирский физико-технический журнал. 1992. Вып. 1. С.77–85.

3. Рождение уединенных вихрей при обтекании мелких сферических углублений / П.Р. Громов, А.Б. Зобнин, М.И. Рабинович, М.М. Сущик. Письма в ЖТФ. Т. 12. Вып. 21. 1986. С. 1323–1328.

4. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Пышный И.А. Вихревая интенсификация теплообмена при обтекании траншейных и луночных рельефов (численное моделирование) // XXVII Сибирский теплофизический семинар СТС–XXVII. Статья № 058. Москва–Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 2004. 103 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕЧЕЙ НА ОСНОВЕ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛА ГОТОВОГО ПРОДУКТА

Дерман В.С., Федоров С.С., Дворецкий Д.С., Толстопят О.А.

*Национальная Металлургическая Академия Украины (НМетАУ),
г. Днепрпетровск, Украина*

Значительная часть промышленной продукции проходит стадию высокотемпературной обработки исходного сырья при температурах от 1000 до 3000 °С в печах плотного или кипящего слоя [1; 2]. В зависимости от технологии готовый продукт часто имеет соответствующий тепловой потенциал, утилизация которого представляет определенные трудности [3].

Перспективным направлением использования физической теплоты готового продукта является применение замкнутой технологической схемы, когда теплота идет на нагрев исходного сырья [3].

Выбор конструкции такого утилизатора теплоты определяется целым рядом факторов: рабочей температурой в печи, фракционным составом материала, физическими свойствами сырья и готового продукта, а также техническими условиями промышленной площадки. Например, для материалов крупностью от 10 мм и выше целесообразно применение для решения этой задачи аппаратов на основе плотного слоя; для частиц 0,5–5 и < 100 мкм соответственно кипящего и взвешенного.

Применительно к высокотемпературным печам кипящего слоя для обработки частиц углеродного материала практическая реализация схемы утилизации теплоты возможна на основе контактных теплообменников – аппаратов кипящего слоя с промежуточным инертным теплоносителем в виде азота. Азот поступает в холодильник готового продукта, где нагревается, охлаждая готовый продукт, и затем, направляется в верхний теплообменник, где нагревает исходное сырье.

Целью данной работы явилось исследование тепловой эффективности использования таких утилизаторов теплоты.

Как известно эффективный теплообмен обеспечивает противоточное движение теплоносителей. Основной проблемой использования аппаратов кипящего слоя в качестве утилизаторов теплоты является наличие идеального прямотока, когда температуры теплоносителей на выходе равны. В результате интенсивного перемешивания в объеме камеры устанавливается одинаковая температура материала, а изменяется только лишь температура газов по направлению их движения. При чем из-за развитой поверхности дисперсных частиц ($1000\text{--}24000\text{ м}^2/\text{м}^3$) это изменение наблюдается на незначительном начальном участке восхождения газового потока.

В случае аппаратов кипящего слоя противоточная схема движения достигается на основе так называемых секционных каскадных схем (рис. 1), где материал проходит последовательно несколько температурных камер. Переход из одной камеры в другую осуществляется через специальные переливные патрубки, так как кипящий слой ведет себя аналогично жидкой среде. С увеличением числа секций секционного теплообменника схема приближается к классическому противотоку.